

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر عدد فرود بر پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست

رسول دانشفراز<sup>۱\*</sup>، سینا صادق فام<sup>۲</sup>، ودود حسن نیا<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده، فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران  
<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده، فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران  
<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد عمران آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۲۷  
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۲۸  
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۲۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۲-۱۴

### کلمات کلیدی:

شیب شکن قائم  
جریان فوق بحرانی  
عمق بحرانی نسبی  
عمق نسبی استخر  
استهلاک انرژی

**خلاصه:** جریان فوق بحرانی به عنوان جریان ورودی در بالادست شیب شکن های قائم در اثر سقوط و برخورد، می تواند قدرت ضربه ای، تخریبی و فرسایشی بسیار قابل توجهی در پایین دست شیب شکن های قائم داشته باشد. بنابراین در این تحقیق با هدف ارزیابی و پیش بینی رفتار کلی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست، ۵۵ آزمایش با دبی ها و اعداد فرود مختلف صورت پذیرفت. نتایج آزمایش ها نشان داد که در جریان های فوق بحرانی با افزایش مقادیر عمق بحرانی نسبی و عدد فرود پارامترهای طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی و طول نسبی کلی شیب شکن افزایش یافتند. این در حالی است که با افزایش مقادیر عمق بحرانی نسبی و عدد فرود پارامتر عمق نسبی استخر ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و استهلاک انرژی نسبی نیز ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. با افزایش عدد فرود در یک عمق بحرانی نسبی ثابت، طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی، طول نسبی کلی شیب شکن و استهلاک انرژی نسبی افزایش و عمق نسبی استخر کاهش می یابد. همچنین در یک عدد فرود ثابت با افزایش عمق بحرانی نسبی طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی، طول نسبی کلی شیب شکن و عمق نسبی استخر افزایش و استهلاک انرژی نسبی کاهش می یابد. نتایج تحقیق حاضر با بازه اعداد فرود بزرگتر با پژوهش های پیشین مورد مقایسه و دلایل تطابق و یا عدم تطابق مورد مطالعه قرار گرفت.

### ۱- مقدمه

هیدرولیکی با شرایط جریان ورودی و خروجی مختلف شناخته شود. شیب شکن های قائم معمولاً در کانال های آبیاری، زهکشی و جمع آوری آب های سطحی با هدف کنترل پایین افتادگی بستر، کنترل تراز آب بالادست، ایجاد سرعت بهینه برای کاهش آبستگي بستر و استهلاک انرژی اضافی جریان به کار گرفته می شوند [۱، ۲]. جریان ورودی به عنوان یکی از مهم ترین مولفه های طراحی، در بالادست شیب شکن های قائم معمولاً دارای حالت زیر بحرانی می باشد. با این حال گاه به دلیل شرایط توپوگرافی منطقه، وجود دریاچه قبل از شیب شکن و همچنین استفاده از شیب شکن ها با فواصل طولی کم، جریان با حالت فوق بحرانی از بالادست این سازه ها عبور می کند. بیشتر مطالعات صورت گرفته در زمینه بررسی پارامترهای

شیب شکن های قائم به عنوان کاهنده شیب طولی زمین به شیب طراحی یکی از سازه های هیدرولیکی هستند که در مناطق با شرایط توپوگرافی کوهستانی جهت انتقال آب از بالادست به پایین دست کانال بکار گرفته می شوند. طراحی مقاوم جهت افزایش استهلاک انرژی جنبشی اضافی جریان در این سازه ها همواره یکی از مشکلات شناخته شده مهندسين هیدرولیک می باشد. دقت مدل های محاسباتی به منظور جلوگیری از تخریب سازه طراحی شده به شرایط ورودی و خروجی جریان و شرایط توپوگرافی منطقه بستگی دارد. بنابراین برای بالا بردن دقت مدل ها باید رفتار سازه های

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: daneshfaraz@yahoo.com



با استفاده از تئوری لایه ی برشی و جت سطحی کاملاً توسعه یافته، معادله ی استهلاک انرژی شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست را بازنویسی کردند [۹].

هانگ و همکاران [۱۱] مطالعاتی در زمینه ی تأثیر شیب پایین دست بر روی پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم در بازه عدد فرود  $0/۸۳ - ۱/۸۴$  انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان شیب پایین دست شیب‌شکن مقادیر پارامترهای طول شیب‌شکن و نیروی برخورد افزایش می‌یابند. کبیری سامانی و همکاران [۱۲] مطالعاتی در زمینه ی پارامترهای هیدرولیکی جریان در مستهلک‌کننده ی شبکه‌ای و شیاری انجام دادند. نتایج تحقیقات این محققین نشان داد که با افزایش نسبت عمق بحرانی به ارتفاع شیب‌شکن، نسبت استهلاک انرژی به انرژی اولیه کاهش می‌یابد. همچنین دریافتند که با افزایش نسبت تخلخل شبکه به تدریج استهلاک انرژی، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شریف و کبیری سامانی [۱۳] در سال ۲۰۱۸ تأثیر عمق پایین دست در شیب‌شکن‌های قائم مجهز به مستهلک‌کننده‌های شبکه‌ای و شیاری با جریان زیر بحرانی در بالادست انجام دادند. این محققین دریافتند که با افزایش عمق نسبی پایاب شیب‌شکن، تداخل آب با هوا، طول نسبی اولین جت برخوردی به استخر و طول نسبی تداخل جریان کاهش و عمق نسبی استخر افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج این محققین نشان داد که سه رژیم جریان جت‌های سقوطی حباب دار، رژیم ناحیه ی حبابی و رژیم جریان‌های سطحی در پایین دست شیب‌شکن‌های مجهز به مستهلک‌کننده ی شبکه‌ای اتفاق می‌افتد.

با بررسی منابع مشاهده گردید که مطالعات اندکی در زمینه بررسی پارامترهای هیدرولیکی روی شیب‌شکن‌ها با جریان فوق بحرانی در بالادست صورت گرفته است. اولین مطالعه ارزیابی رفتار پارامترهای هیدرولیکی با جریان فوق بحرانی در بالادست توسط چمنی و بیرامی در سال ۲۰۰۲ انجام شده است [۱]. آن‌ها با انجام آزمایش‌های خود در بازه عدد فرود ۲ تا ۹ با دبی‌های مختلف نشان دادند که پارامترهای هیدرولیکی در جریان‌های فوق بحرانی به دو پارامتر بی بعد عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست وابسته هستند، بدین صورت که در یک عمق بحرانی نسبی ثابت با افزایش عدد فرود پارامترهای استهلاک انرژی نسبی، عمق نسبی پایین دست و عمق نسبی استخر

هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم معمولاً معطوف به جریان زیر بحرانی در بالادست می‌باشد. مهم‌ترین پارامترهای هیدرولیکی مورد مطالعه در بررسی‌های مذکور، عمق استخر، عمق پایین دست قبل از پرش، طول شیب‌شکن و میزان استهلاک انرژی می‌باشند. این پارامترها در جریان زیر بحرانی توسط بختف [۳]، مور [۴]، وایت [۵]، رند [۶]، گیل [۲]، چانسون [۷]، راجاراتنام و چمنی [۸] و چمنی و همکاران [۹] مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مطالعه‌های اولیه در زمینه شیب‌شکن‌های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست در سال ۱۹۳۲ توسط بختف انجام شد [۳]. مور در سال ۱۹۴۳ با بررسی آزمایشگاهی اندازه‌گیری مشخصات هیدرولیکی شیب‌شکن قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست نشان داد که استهلاک انرژی در شیب‌شکن تابعی از ارتفاع نسبی شیب‌شکن می‌باشد، همچنین مشخص شد که با افزایش ارتفاع نسبی شیب‌شکن از ۱ به ۱۲، استهلاک انرژی نسبی از ۰ تا ۰٫۵۳ افزایش یافت [۴].

وایت برای اولین بار با روش تحلیلی و بر اساس فرضیه‌هایی معادله ی انرژی مخصوص در سازه‌های شیب‌شکن را ارائه داد [۵]. این محقق دلیل اصلی استهلاک انرژی جریان در پایین دست را تلاطم و مخلوط شدن جریان در استخر معرفی کرد. بعد از آن رند با انجام آزمایش‌هایی در زمینه هندسه ی جریان شیب‌شکن‌های قائم، عدد بی بعدی به نام عدد شیب‌شکن را به عنوان اصلی‌ترین عامل تأثیرگذار در پارامترهای هیدرولیکی شیب‌شکن‌های قائم معرفی کرد [۶]. همچنین با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی مور [۴] و داده‌های حاصل از آزمایش‌های خود، در حالت جریان زیر بحرانی معادله ی تجربی برای عمق پایین‌دست شیب‌شکن، عمق استخر، طول استخر، طول پرش و عمق ثانویه ی پرش را برحسب عدد شیب‌شکن ارائه نمود، اما به دلیل نواقص موجود در فرضیه‌های اعمال شده، نتایج خوبی از معادله‌های ارائه شده توسط این محقق حاصل نشد. راجاراتنام و چمنی در سال ۱۹۹۵ با مطالعه تحلیلی و تجربی، روابطی را برای پیش‌بینی استهلاک انرژی نسبی و عمق نسبی استخر ارائه دادند [۸]. تأثیر وجود یک پله با ابعاد مختلف در پایین‌دست شیب‌شکن‌های قائم بر روی استهلاک انرژی در سال ۲۰۰۴ توسط اسن و همکاران [۱۰] مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت. این محققین روابطی برای عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین دست برای حالت با و بدون پله ارائه دادند. چمنی و همکاران

جدول ۱. خلاصه مطالعات صورت گرفته در زمینه شیب شکن های قائم برای جریان فوق بحرانی در بالادست  
Table 1. Summary of studies in the field of vertical drop for supercritical flow at upstream

| محققین              | بازه عدد فرود | تشابه نتایج  | تفاوت نتایج   | حسن تحقیق   |
|---------------------|---------------|--|---|---|
| چمنی و بیرامی [۱]   | ۹-۲           | - رفتار عمق استخر تحت تأثیر عدد فرود لیو و همکاران [۱۵]  | - رفتار عمق استخر تحت تأثیر عدد فرود توکیای و یلدیز [۱۴]<br>- رفتار و مقادیر استهلاک انرژی توکیای و یلدیز [۱۴]                | - اولین تحقیق در زمینه بررسی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن با جریان فوق بحرانی |
| توکیای و یلدیز [۱۴] | ۴/۰۱ - ۱/۳۱   | - رفتار طول شیب شکن تحت تأثیر عدد فرود لیو و همکاران [۱۵]  | رفتار عمق استخر تحت تأثیر عدد فرود چمنی و بیرامی [۱] و لیو و همکاران [۱۵]<br>- رفتار و مقادیر استهلاک انرژی چمنی و بیرامی [۱] | - معرفی و ارزیابی پدیده پاشیدگی جریان   |
| لیو و همکاران [۱۵]  | ۴/۸۸ - ۱/۴۳   | - رفتار عمق استخر تحت تأثیر عدد فرود چمنی و بیرامی [۱]<br>- رفتار طول شیب شکن تحت تأثیر عدد فرود توکیای و یلدیز [۱۴] | رفتار عمق استخر تحت تأثیر عدد فرود توکیای و یلدیز [۱۴]  | - ارزیابی رفتار شیب شکن تحت تأثیر شیب بالادست                                 |

عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی برای دو مطالعه دارای رفتارهای متفاوتی از هم می باشد. به گونه ای که مقادیر پارامترهای عمق نسبی استخر، عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی برای مطالعه چمنی و بیرامی [۱] بسیار کوچکتر از مقادیر مطالعه توکیای و یلدیز [۱۴] می باشد. لیو و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۴ تأثیر شیب بالادست روی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست را در بازه عدد فرود ۴/۸۸ - ۱/۴۳ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش ها نشان داد که با افزایش عدد فرود و شیب بالادست، مقادیر عمق لبه، عمق آب داخل استخر و زاویه برخورد جت کاهش و فاصله محل برخورد جت با کف افزایش می یابد. همچنین ثابت کردند که با افزایش عمق بحرانی نسبی، طول نسبی شیب شکن، عمق نسبی استخر و عمق نسبی پایین دست افزایش می یابد. بنابراین نتایج این محققین برای پیش بینی رفتار عمق استخر تحت تأثیر عدد فرود بالادست، همسو با نتایج چمنی و بیرامی [۱] و مغایر با نتایج توکیای و یلدیز [۱۴] و نتایج مربوط به پیش بینی رفتار طول نسبی شیب شکن تحت تأثیر عدد فرود بالادست نیز همسو با نتایج توکیای و یلدیز [۱۴] می باشد. جدول (۱) با هدف نشان دادن تشابه، تفاوت و حسن پژوهش های

کاهش می یابند. با ثابت بودن عدد فرود و افزایش عمق بحرانی نسبی، استهلاک انرژی نسبی کاهش و مقادیر عمق نسبی پایین دست و عمق نسبی استخر افزایش می یابند. این در حالی است که این محققین تأثیر عدد فرود بالادست بر پارامتر طول نسبی شیب شکن که به عنوان یکی از پارامترهای مهم در طراحی حوضچه های آرامش پایین دست محسوب می شود را مورد مطالعه قرار ندادند.

توکیای و یلدیز [۱۴] مطالعاتی بر روی شیب شکن قائم تحت شرایط فوق بحرانی در بالادست با محدوده عدد فرود ۴/۰۱-۱/۳۱ انجام دادند و برای اولین بار پدیده ی جدیدی به نام پاشیدگی جریان در اثر برخورد جت با کف استخر را ارائه و با دو پارامتر طول پاشیدگی و عمق پاشیدگی معرفی کردند. علاوه بر این روابطی برحسب عدد فرود و ارتفاع نسبی شیب شکن برای پارامترهای طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی، عمق نسبی پاشیدگی، طول نسبی کلی شیب شکن، عمق نسبی پایین دست و استهلاک انرژی نسبی با ضرایب همبستگی پایین ارائه دادند. توکیای و یلدیز [۱۴] برخلاف یافته های چمنی و بیرامی [۱]، دریافتند که عمق نسبی استخر به مقادیر عدد فرود بالادست بستگی نداشته و فقط به ارتفاع نسبی شیب شکن بستگی دارد. همچنین نتایج مربوط به پارامترهای

جدول ۲. مشخصات مدل آزمایشگاهی

Table 2. Characteristics of the experimental model

| مشخصات مدل                  |            |             |          |              |          |          |
|-----------------------------|------------|-------------|----------|--------------|----------|----------|
| دریچه مولد جریان فوق بحرانی |            |             |          | شیب شکن قائم |          |          |
| ارتفاع بازشدگی (cm)         | ضخامت (cm) | ارتفاع (cm) | عرض (cm) | ارتفاع (cm)  | عرض (cm) | طول (cm) |
| ۲/۱-۱/۷-۱/۳                 | ۰/۳        | ۶۵          | ۳۰       | ۱۵           | ۳۰       | ۱۲۰      |

ایجاد جریان فوق بحرانی با اعداد فرود مختلف در دبی های ثابت، یک دریچه فولادی به ضخامت ۳ میلی متر با بازشدگی های ۱/۳، ۱/۷ و ۲/۱ سانتی متر و فاصله ۵۰ سانتی متر از لبه شیب شکن نصب گردید. برای دستیابی به محدوده گسترده تری از اعداد فرود نیز، ارتفاع مخزن پشت دریچه به میزان ۲۵ سانتی متر افزایش داده شد. همچنین مشخصات مدل آزمایشگاهی در جدول (۲) آورده شده است.

شکل (۱) نشان دهنده نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی و جریان و شکل (۲) نیز نمونه ای از جریان در فلوم آزمایشگاهی مورد مطالعه را نشان داده شده است.

با اجرای ۵۵ آزمایش با دبی های مختلف در محدوده ۲/۵ الی ۱۱/۶۷ لیتر بر ثانیه و محدوده عدد فرود ۱/۴۸ الی ۹/۷ پارامترهای عمق استخر، عمق پایین دست، طول شیب شکن، طول پاشیدگی، طول کلی شیب شکن و استهلاک انرژی مورد بررسی قرار گرفت. محدوده متغیرهای اندازه گیری شده در مدل های مختلف شیب شکن قائم در تحقیق حاضر در جدول (۳) ارائه شده است.

در تحقیق حاضر میزان هد کل بالادست شیب شکن از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$H_0 = h + y_0 + \frac{q^2}{2gy_0^2} \quad (1)$$

که در آن  $H_0$  هد کل بالادست شیب شکن،  $y_0$  عمق آب بالادست شیب شکن،  $q$  دبی در واحد عرض و  $g$  شتاب گرانش زمین می باشد. همچنین پس از اندازه گیری مقدار عمق پایین دست ( $y_1$ )، انرژی پایین دست ( $H_1$ ) نیز از رابطه (۲) محاسبه گردید:

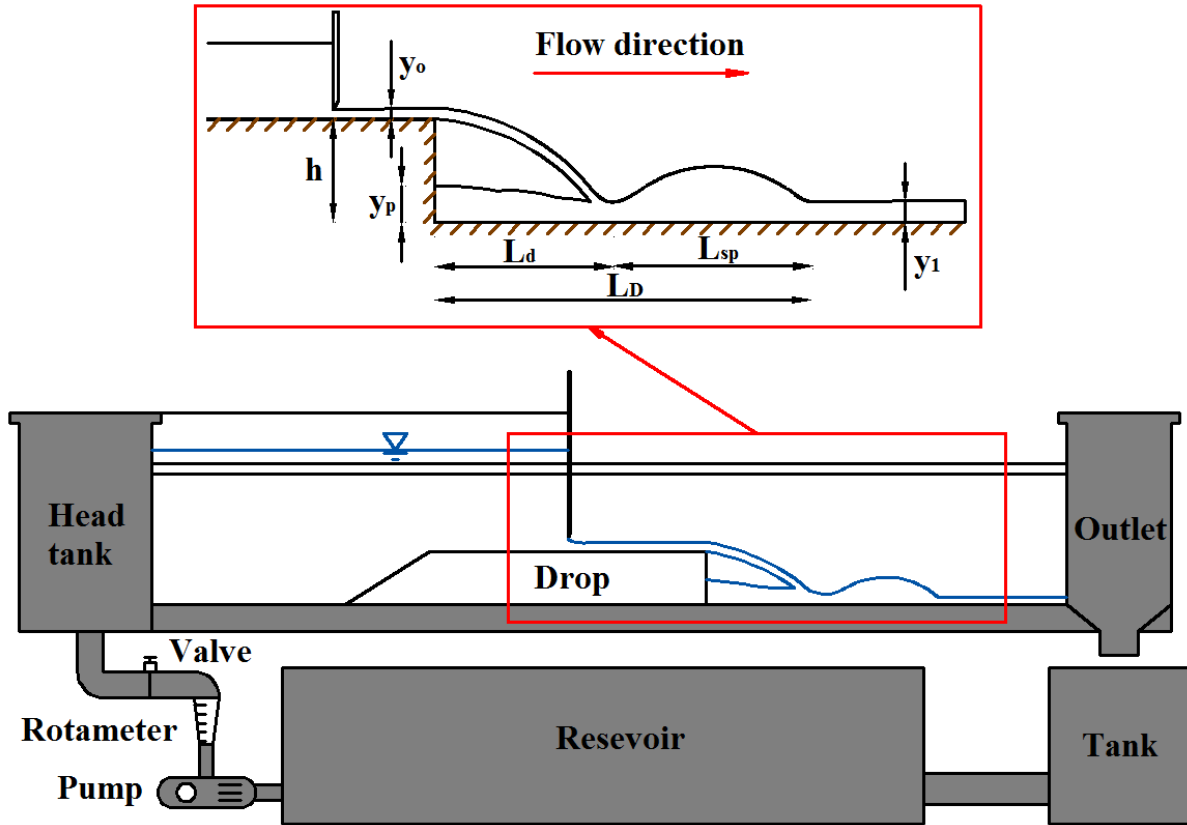
$$H_1 = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} \quad (2)$$

صورت گرفته با یکدیگر در زمینه شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست تنظیم گردید.

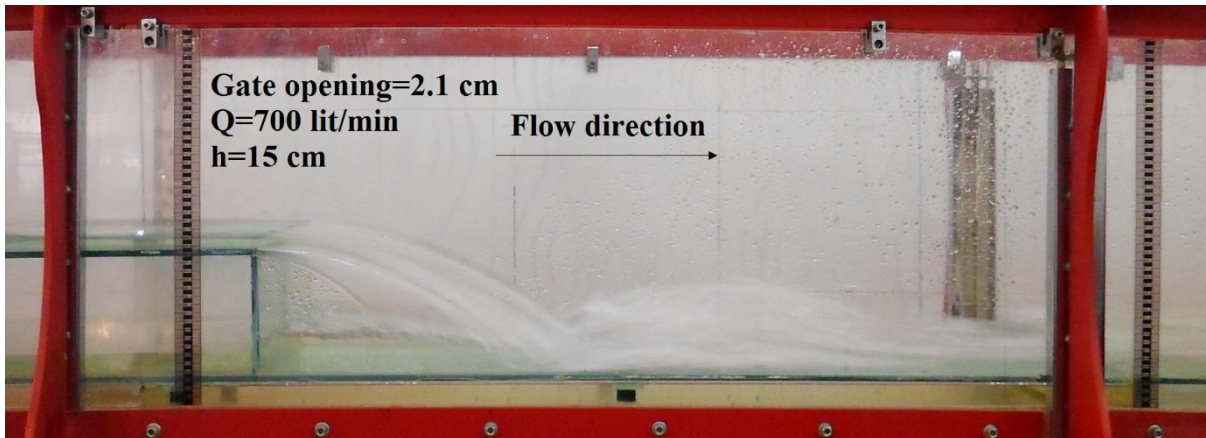
با توجه به اینکه جریان فوق بحرانی نسبت به جریان زیر بحرانی دارای سرعت زیادی است. بنابراین قدرت ضربه ای، تخریبی و فرسایشی آن بسیار بیشتر از جریان زیر بحرانی در پایین دست شیب شکن های قائم می باشد. همچنین از آنجائیکه مطالعات محدودی در زمینه بررسی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست صورت گرفته و نیز دارای تناقض هایی در پیش بینی رفتار این پارامترها می باشند. لذا تحقیق حاضر با هدف ارزیابی رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست با اعماق بحرانی نسبی و اعداد فرود متفاوت و مقایسه آن با پژوهش های انجام یافته قبلی در این زمینه صورت گرفته است.

## ۲- مواد و روش ها

آزمایش ها در فلوم آزمایشگاهی مستطیلی شکل با کف و دیواره هایی از جنس پلکسی گلس شفاف به طول ۵ متر، عرض ۰/۳ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر در طول کانال انجام پذیرفت. جریان مورد نیاز فلوم توسط دو عدد پمپ هر کدام با توان ۴۵۰ لیتر در دقیقه تأمین و دبی جریان با استفاده از روتامتر نصب شده بر روی پمپ با خطای نسبی  $\pm 2\%$  درصد تنظیم می شود. برای افزایش دقت در اندازه گیری، تمامی عمق های مورد اندازه گیری در پنج نقطه در عرض کانال و با عمق سنج نقطه ای با دقت یک میلی متر اندازه گیری شد. سازه شیب شکن با استفاده از باکس های شیشه ای هم عرض کانال به طول ۱/۲ متر و با ارتفاع ۰/۱۵ متر مورد استفاده قرار گرفت. در دیواره لبه شیب شکن و زیر جت در حال سقوط، سوراخ هایی به منظور هوادهی جریان ایجاد گردید (چانسون و تومبس [۱۶]). برای



شکل ۱. نمای شماتیک فلوم آزمایشگاهی  
Fig. 1. Schematic view of laboratory flume



شکل ۲. تصویر جریان فوق بحرانی در شیبشکن قائم  
Fig. 2. Image of supercritical flow in vertical drop

$$\frac{h_L}{H_0} = \frac{H_0 - H_1}{H_0}$$

(۴) مقدار استهلاک انرژی ( $h_L$ ) و استهلاک انرژی نسبی ( $\frac{h_L}{H_0}$ ) از

روابط (۳) و (۴) محاسبه شدند:

به منظور دستیابی به اهداف مطالعه حاضر که ارزیابی رفتار

$$h_L = H_0 - H_1$$

(۳)

جدول ۳. محدوده متغیرهای اندازه گیری شده در مدل شیبشکن قائم  
Table 3. The range of measured variables in the vertical drop model

| محدوده متغیرها                               |            |            | متغیرهای اندازه گیری شده |
|--|------------|------------|--------------------------|
| شیبشکن قائم ساده با بازشدگی های مختلف دریاچه |            |            |                          |
| ۲/۱  | ۱/۷        | ۱/۳        |                          |
| ۱۱/۶۶-۳/۳۳                                   | ۱۰/۸۳-۲/۹۱ | ۷/۹۱-۲/۵   | $Q(L/s)$                 |
| ۱/۷۸-۱/۴۴                                    | ۱/۴۵-۱/۲۳  | ۱/۰۳۳-۰/۹۱ | $y_0(cm)$                |
| ۶/۲۵-۴/۵۵                                    | ۵/۱۲-۳/۸   | ۴/۳۵-۳/۴۵  | $y_p(cm)$                |
| ۱/۹۷-۰/۸۶                                    | ۱/۸۸-۰/۷۷  | ۱/۴۸-۰/۶۸  | $y_1(cm)$                |
| ۳۹/۳۵-۱۱                                     | ۴۰/۴-۱۰/۸  | ۴۰-۱۲/۸    | $L_d(cm)$                |
| ۴۰/۸-۷/۷                                     | ۴/۵۸-۸/۳   | ۴۷/۲-۸/۶   | $L_{sp}(cm)$             |
| ۸۰/۱۵-۱۸/۷                                   | ۸۶/۲-۱۹/۱  | ۸۷/۲-۲۱/۴  | $L_D(cm)$                |

معنی دار کردن پارامترهای موجود در رابطه (۶)، برخی از پارامترهای بی بعد بر  $\frac{h}{y_0}$  تقسیم شدند که به صورت رابطه (۷) ارائه گردید.

$$f_3(Fr_0, Re, \frac{y_c}{h}, \frac{y_1}{h}, \frac{y_p}{h}, \frac{L_d}{h}, \frac{L_{sp}}{h}, \frac{L_D}{h}, \frac{h_L}{H_0}) = 0 \quad (7)$$

از آنجایی که بازه عدد رینولدز در این مطالعه بین ۷۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ می باشد، بنابراین جریان کاملاً متلاطم بوده و می توان از اثر لزوجت صرف نظر نمود (راجاراتنام [۱۷]، هاگر و برمن [۱۸] و چاو [۱۹]). همچنین کمیت های بی بعد  $(\frac{y_1}{h}, \frac{y_p}{h}, \frac{L_d}{h}, \frac{L_{sp}}{h}, \frac{L_D}{h}, \frac{h_L}{H_0})$  پارامترهای وابسته مطالعه حاضر می باشند که می توان کمیت های بی بعد وابسته را براساس کمیت های مستقل بصورت زیر بیان نمود:

$$\frac{y_1}{h}, \frac{y_p}{h}, \frac{L_d}{h}, \frac{L_{sp}}{h}, \frac{L_D}{h}, \frac{h_L}{H_0} = f_4(Fr_0, \frac{y_c}{h}) \quad (8)$$

در این تحقیق برای به دست آوردن روابط تجربی ۸۰ درصد از داده های تجربی به طور تصادفی انتخاب شده و به عنوان ورودی استفاده شدند. ۲۰ درصد باقی مانده از داده ها نیز برای تایید این معادلات استفاده شد. همچنین از سه شاخص آماری جهت ارزیابی روابط ارائه شده برای پارامترهای هیدرولیکی بر روی شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست به شرح جدول (۴) استفاده شده است. جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و خطای نسبی (RE) بین مقادیر آزمایشگاهی و پیش بینی شده می باشند.

کلی پارامترهای موثر شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست می باشد، ابتدا پارامترهای موثر شناسایی و پس از آن با تجزیه و تحلیل ابعادی روابط کلی شامل پارامترهای بی بعد استخراج گردیدند. پارامترهای موثر در این تحقیق را می توان به صورت رابطه (۵) نوشت:

$$f_1(\rho, \mu, g, Q, B, h, y_c, y_0, y_1, y_p, L_d, L_{sp}, L_D, \frac{h_L}{H_0}) = 0 \quad (5)$$

که در آن،  $\rho$  جرم مخصوص آب  $[ML^{-3}]$ ،  $\mu$  لزوجت دینامیکی  $[ML^{-1}T^{-1}]$ ،  $g$  شتاب گرانش زمین  $[LT^{-2}]$ ،  $Q$  دبی جریان  $[L^3T^{-1}]$ ،  $B$  عرض کانال  $[L]$ ،  $h$  ارتفاع شیب شکن  $[L]$ ،  $y_c$  عمق بحرانی  $[L]$ ،  $y_0$  عمق بالادست شیب شکن  $[L]$ ،  $y_1$  عمق بعد از پاشیدگی جت  $[L]$ ،  $y_p$  عمق استخر زیر جت در حال سقوط  $[L]$ ،  $L_d$  فاصله محل جت برخوردی به استخر با شیب شکن  $[L]$ ،  $L_{sp}$  طول پاشیدگی  $[L]$ ،  $L_D$  طول کلی شیب شکن  $[L]$ ، و  $\frac{h_L}{H_0}$  استهلاک انرژی نسبی  $[-]$  می باشند. با استفاده از تئوری پی باکینگهام و با در نظر گرفتن  $\rho$  و  $g$  به عنوان متغیرهای تکراری، کمیت های بدون بعد بصورت زیر محاسبه شدند.

$$f_2(Fr_0, Re, \frac{h}{y_0}, \frac{y_c}{y_0}, \frac{y_1}{y_0}, \frac{y_p}{y_0}, \frac{L_d}{y_0}, \frac{L_{sp}}{y_0}, \frac{L_D}{y_0}, \frac{h_L}{H_0}) = 0 \quad (6)$$

که در آن  $Re$  نشان دهنده عدد رینولدز می باشد. همچنین برای

جدول ۴. روابط معیارهای ارزیابی

Table 4. The relationships of evaluation criteria

| معادلات  | معیارهای ارزیابی        |
|--|-------------------------|
| $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{exp} - X_{cal})^2}$   | خطای جذر میانگین مربعات |
| $R^2 = \left( \frac{n \sum X_{exp} X_{cal} - (\sum X_{exp})(\sum X_{cal})}{\sqrt{n(\sum X_{exp}^2) - (\sum X_{exp})^2} \sqrt{n(\sum X_{cal}^2) - (\sum X_{cal})^2}} \right)^2$ | ضریب تعیین              |
| $RE = \frac{ X_{exp} - X_{cal} }{X_{exp}}$   | خطای نسبی               |

که در آن:  $n$  تعداد داده‌های آزمایشگاهی،  $X_{exp}$  مقادیر آزمایشگاهی و  $X_{cal}$  مقادیر محاسبه شده پارامتر هیدرولیکی  $X$  می‌باشند.

### ۳- نتایج و بحث

برخورد جت با کف استخر می باشد. بنابراین برای محدود کردن این فاصله باید راهکاری برای پیش بینی این پارامتر ارائه گردد. اگر جت عبوری از لبه شیب شکن مانند یک جسم در نظر گرفته شود، با در نظر گرفتن رابطه طول پرتابه ( $L_d = V_0 \sqrt{\frac{2h}{g}}$ ) مشاهده می گردد که فاصله افقی طی شده توسط پرتابه به دو عامل سرعت اولیه ( $V_0$ ) و اختلاف ارتفاعی دو سطح (ارتفاع شیب شکن) بستگی دارد. بنابراین می توان از روابط زیر جهت محاسبه طول نسبی فاصله طی شده (طول نسبی شیب شکن) استفاده نمود:

$$\frac{L_d}{h} = V_0 \sqrt{\frac{2}{gh}} \quad (9)$$

$$\frac{L_d}{h} = Fr_0 \sqrt{\frac{2y_0}{h}} \quad (10)$$

رابطه (۱۰) نشان می دهد که طول نسبی شیب شکن به سه عامل ارتفاع شیب شکن، عدد فرود و عمق بالادست بستگی دارد. عمق بالادست نیز به دو عامل عدد فرود و دبی جریان وابسته بوده ( $y_0 \propto qFr_0$ ) که با توجه به موجود بودن عدد فرود در رابطه می توان عمق بحرانی را به عنوان نماینده ی دبی جریان (  $y_e = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{0.33}$ ) و تأثیرگذار در طول نسبی شیب شکن به جای عمق بالادست جایگزین نمود.

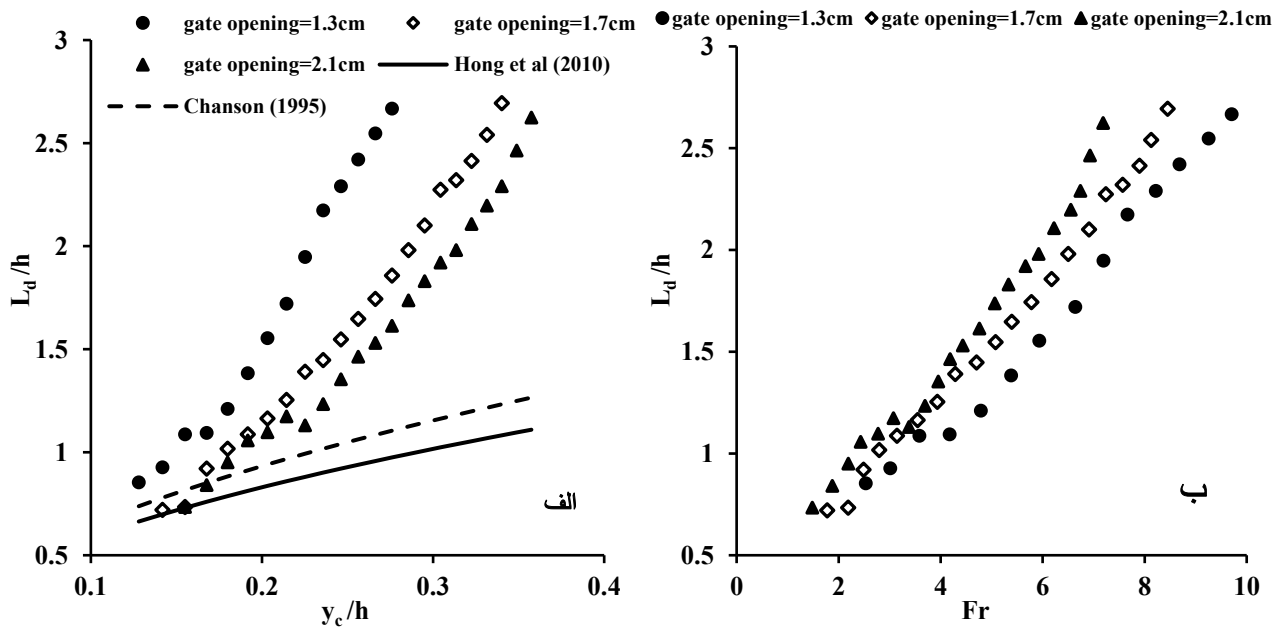
$$\frac{L_d}{h} \propto Fr_0 \frac{y_e}{h} \quad (11)$$

شکل (۳) طول نسبی شیب شکن با حالت جریان فوق بحرانی در

در شیب شکن های قائم با جریان های فوق بحرانی در بالادست، با عبور جریان از لبه شیب شکن به جهت سرعت بالای جریان نسبت به جریان های زیر بحرانی، جت عبوری در فاصله ای دورتر و به تبع آن با زاویه برخورد کمتری سقوط می کند [۱۴، ۱۵]. شناخت مشخصات برخورد جت جریان به کف استخر همواره به دلیل خوردگی کف و ایجاد چاله در پایین دست حائز اهمیت بوده است (چانسون [۷]، چانسون و گوالتری [۲۰]، موسا و همکاران [۲۱]). با سقوط جت در حال افتادن به داخل استخر و بعد از برخورد با آن، جریان به دو قسمت تقسیم می شود که قسمتی از آن به طرف استخر و قسمت دیگر آن به سمت پایین دست جریان می یابد. جریان برگشتی به داخل استخر به عنوان مولفه اصلی افزایش دهنده عمق استخر زیر جت شناخته شده است [۵، ۸]. میزان جریان برگشتی به داخل استخر خود به دو عامل دبی جریان ورودی و زاویه برخورد جت با کف استخر معرفی شده است. به طوریکه با افزایش دبی و زاویه برخورد جت عبوری، عمق استخر زیر جت در حال سقوط افزایش می یابد [۲]. همچنین استهلاک انرژی در این سازه ها به جهت اثر ضربه ای جت به کف استخر و تلاطم جریان در استخر زیر جت معرفی شده است [۵، ۸].

### ۳-۱ طول شیب شکن

فاصله ی افقی لبه شیب شکن با محل برخورد جت در حال سقوط با کف استخر که به عنوان طول شیب شکن شناخته می شود، پارامتری مهم در طراحی شیب شکن ها و کنترل آبشستگی ناشی از



شکل ۳. تغییرات طول نسبی شیبشکن نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست

Fig.3. Variation of the relative length of the drop to a) Relative critical depth and b) Froude number

$$\frac{L_d}{h} = 0.7647 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0.8426} (Fr)^{0.9204} + 0.524 \quad (12)$$

مقایسه مقادیر طول نسبی شیب شکن توکیای و یلدیز [۱۴] برحسب عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه (۱۲) نشان داد که متوسط خطای نسبی بین این دو مقدار ۱۶ درصد می باشد؛ که با توجه به شرایط آزمایشگاهی و بازه اعداد فرود متفاوت قابل قبول است. همچنین مقایسه مقادیر آزمایشگاهی طول نسبی شیب شکن با مقادیر پیش بینی شده آن در شکل (۴) نشان داده شده و بیان می دارد که متوسط خطای نسبی آن ۳/۲۱ درصد و حداکثر خطای موجود ۱۶ درصد می باشد.

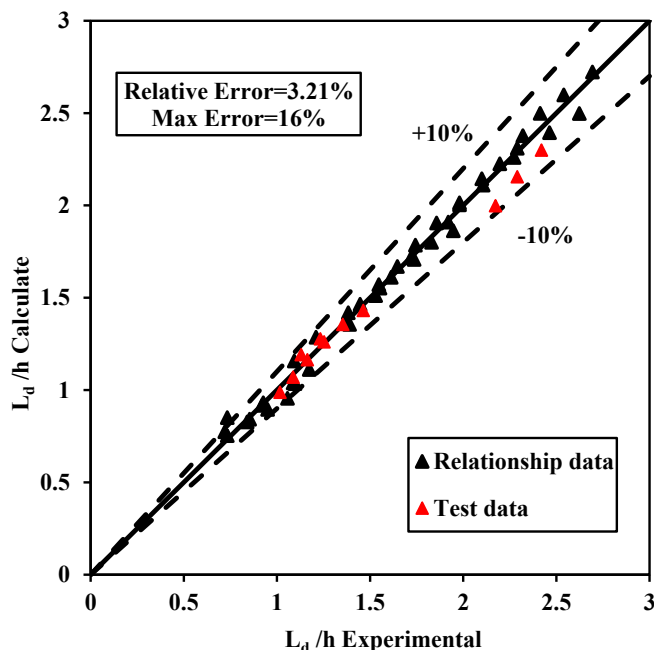
### ۳-۲ طول پاشیدگی

برای اولین بار وجود پاشیدگی جریان بعد از برخورد جت با کف استخر در شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست توسط توکیای و یلدیز [۱۴] مطرح شد. این در حالی است که در مطالعه صورت گرفته توسط چمنی و بیرامی [۱] که برای جریان های فوق بحرانی با بازه عدد فرود ۲-۹ بود اشاره ای به وجود این پارامتر نشده است. همچنین در هیچ یک از مطالعات انجام شده

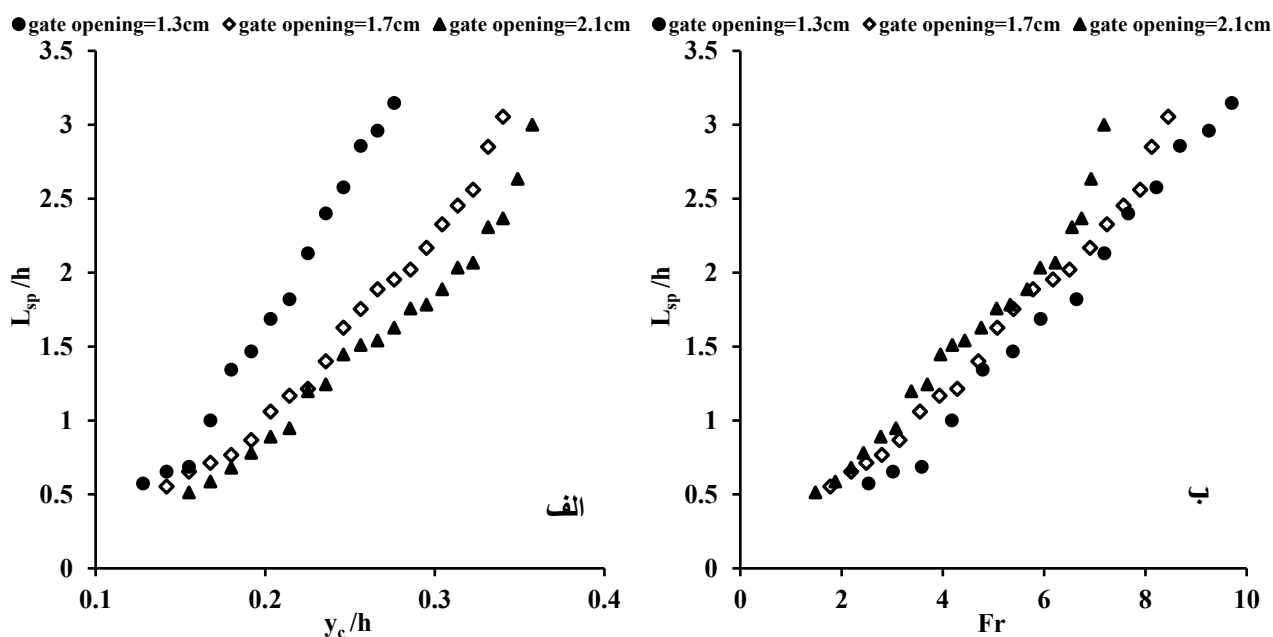
بالادست را نسبت به عمق بحرانی نسبی و عدد فرود نشان می دهد. مقایسه نتایج مربوط به طول نسبی شیب شکن در حالت جریان فوق بحرانی با پژوهش های گذشته در زمینه جریان زیر بحرانی نشان داد که نوع جریان تأثیر زیادی بر روی طول نسبی شیب شکن دارد.

مطابق شکل (۳-الف و ب) مشاهده می گردد که با افزایش پارامترهای عمق بحرانی نسبی و عدد فرود مقدار طول نسبی شیب شکن افزایش می یابد. دلیل این امر نیز افزایش سرعت جت پرتابی و به تبع آن افزایش طول نسبی شیب شکن با افزایش عدد فرود و عمق بحرانی نسبی می باشد. همچنین مقایسه شکل (۳-الف و ب) نشان می دهد که برای یک عمق بحرانی نسبی ثابت، با افزایش میزان بازشدگی دریچه که رابطه عکسی با عدد فرود دارد، مقدار پارامتر طول نسبی شیب شکن کاهش می یابد. به عبارت دیگر برای عمق بحرانی نسبی ثابت با افزایش عدد فرود، طول نسبی شیب شکن افزایش می یابد. برای اعداد فرود ثابت نیز، با افزایش عمق بحرانی نسبی طول نسبی شیب شکن افزایش می یابد. همچنین رابطه ی (۱۲) برای پیش بینی طول نسبی شیب شکن برای شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست برحسب عمق بحرانی نسبی و عدد فرود ارائه گردید:





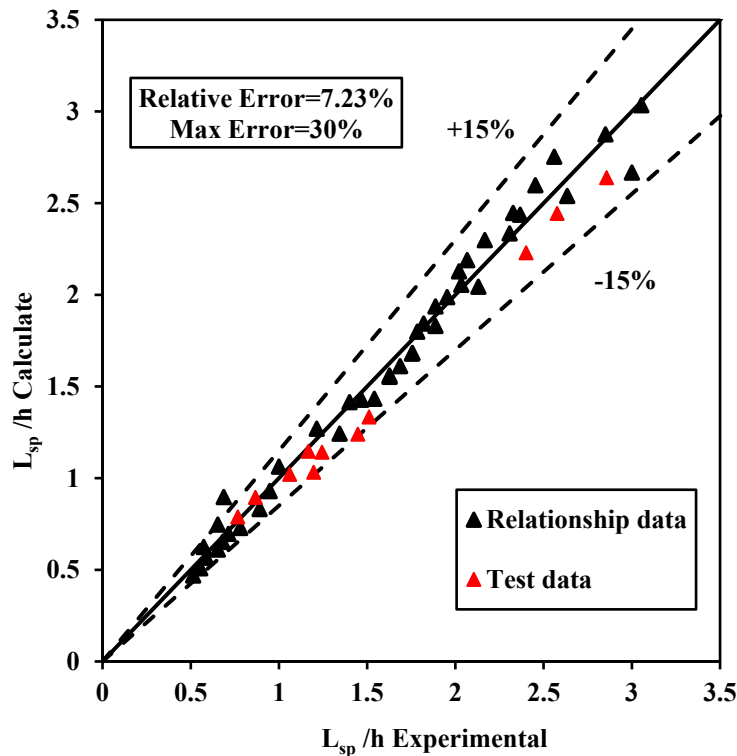
شکل ۴. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی  $\frac{L_d}{h}$  با مقادیر محاسباتی  
 Fig. 4. Comparison of laboratory values  $\frac{L_d}{h}$  with computational values



شکل ۵. تغییرات طول نسبی پاشیدگی نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست  
 Fig. 5. Variation of the relative length of splashing to a) Relative critical depth and b) Froude number

نیز، قدرت زیاد جریان در حال سقوط می باشد. با برخاستن جریان و انتقال تقریباً افقی آن از یک مقطع به مقطع دیگر انتظار می رود برای طراحی شیب شکن ها در حالت جریان فوق بحرانی پیش بینی

در شیب شکن های قائم با جریان زیر بحرانی در بالادست نیز به وجود پاشیدگی جریان اشاره نشده است. علت پاشیدگی و جدا شدن جریان بعد از برخورد جت با کف استخر در جریان های فوق بحرانی



شکل ۶. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی  $\frac{L_{sp}}{h}$  با مقادیر محاسباتی

Fig. 6. Comparison of laboratory values  $\frac{L_{sp}}{h}$  with computational values

$$\frac{L_{sp}}{h} = 0.609 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0.627} (Fr)^{1.04} + 0.183 \quad (13)$$

مقایسه مقادیر آزمایشگاهی طول نسبی پاشیدگی با مقادیر پیش بینی شده آن نشان داد که متوسط خطای نسبی آن ۷/۲۳ درصد و حداکثر خطای موجود ۳۰ درصد می باشد.

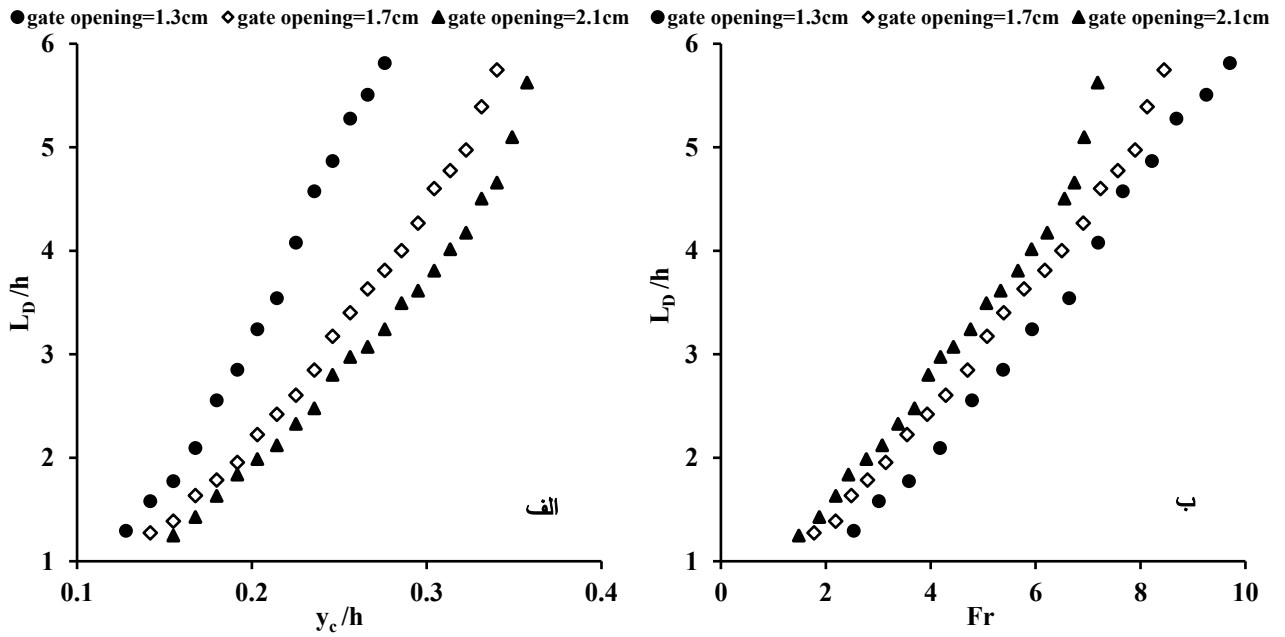
### ۳-۳ طول کلی شیب شکن

فاصله محل برخورد پاشیدگی جریان از لبه شیب شکن که با عنوان طول کلی شیب شکن در جریان فوق بحرانی روگذرهای آزاد شناخته می شود، از حاصل جمع فاصله جت برخوردی به کف از لبه شیب شکن با طول پاشیدگی ( $L_D = L_d + L_{sp}$ ) محاسبه می شود [۱۴]. شکل (۷) طول نسبی کلی شیب شکن در مقابل عمق بحرانی نسبی و عدد فرود را نشان می دهد.

همانطور که داده های آزمایشگاهی حاضر نشان می دهد رفتار پارامتر طول کلی شیب شکن با تغییرات عمق بحرانی نسبی و عدد

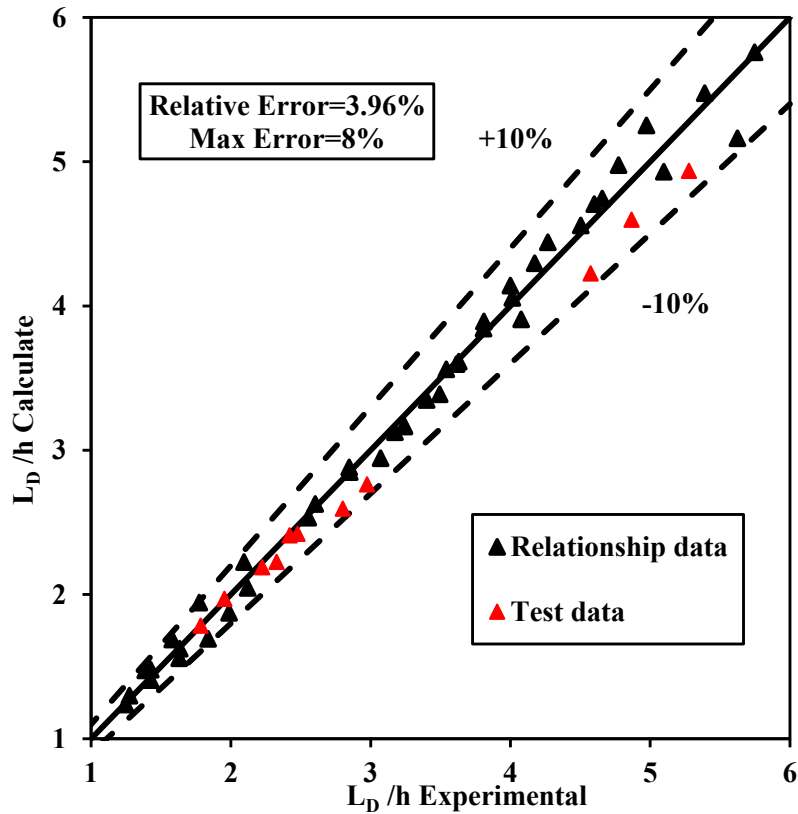
طول این پارامتر دارای اهمیت باشد. شکل (۵) طول نسبی پاشیدگی جریان در مقابل عمق بحرانی نسبی و عدد فرود را نشان داده و بیان می دارد که با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود، طول نسبی پاشیدگی نیز افزایش می یابد.

مطابق شکل (۵-الف و ب) مشاهده می گردد که با افزایش عدد فرود در یک عمق بحرانی نسبی ثابت طول نسبی پاشیدگی افزایش می یابد. این روند برای عدد فرود ثابت نیز صادق است، به گونه ای که با افزایش عمق بحرانی نسبی در یک عدد فرود ثابت طول نسبی پاشیدگی نیز افزایش می یابد. این در حالی است که مقایسه شکل (۵-الف و ب) نشان می دهد که تاثیر افزایش عدد فرود در یک عمق بحرانی نسبی ثابت در افزایش طول نسبی پاشیدگی نسبت به تاثیر افزایش عمق بحرانی نسبی در یک عدد فرود ثابت بیشتر می باشد. همچنین با استفاده از داده های آزمایشگاهی رابطه ی (۱۳) برای پیش بینی فاصله افقی محل برخورد جت با کف استخر تا محل برخورد پاشیدگی جریان برحسب عمق بحرانی نسبی و عدد فرود ارائه گردید:



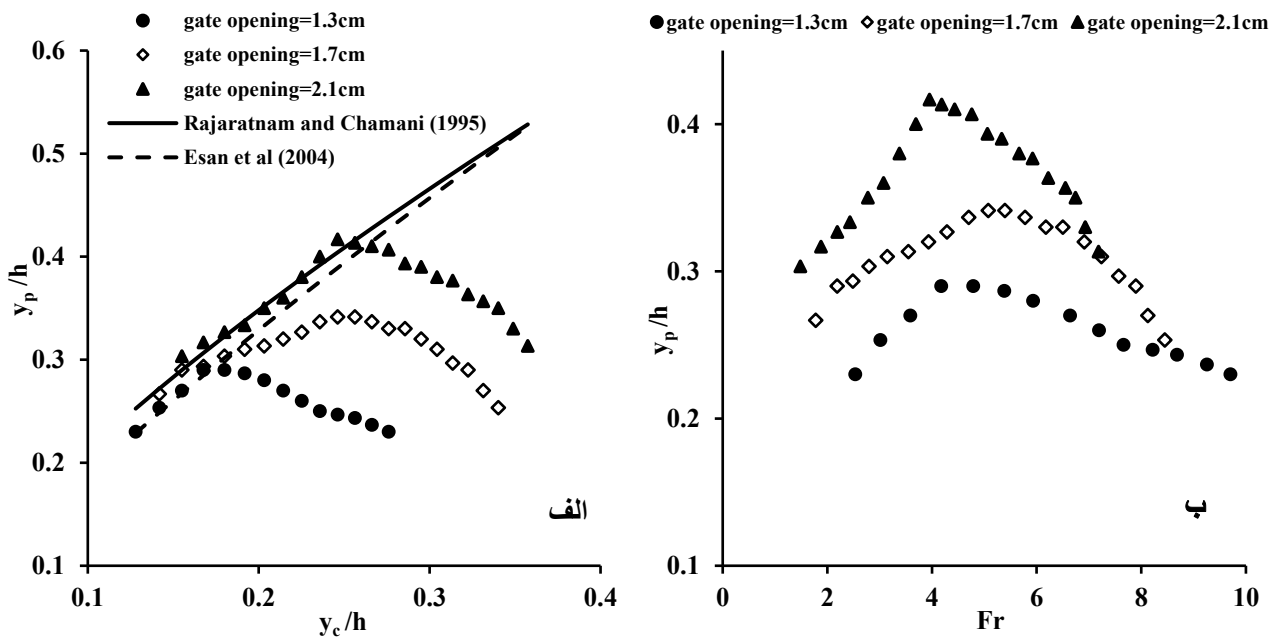
شکل ۷. تغییرات طول نسبی کلی شیب شکن نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست

Fig. 7. Variation of the total relative length of drop to a) Relative critical depth and b) Froude number



شکل ۸. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی  $\frac{L_D}{h}$  با مقادیر محاسباتی

Fig. 8. Comparison of laboratory values of  $\frac{L_D}{h}$  with computational values



شکل ۹. تغییرات عمق نسبی استخر نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست  
 Fig. 9. Variation relative pool of the depth to a) Relative critical depth and b) Froude number

[۱] و توکیای و یلدیز [۱۴] وجود تفاوت کلی در نوع رفتار و مقادیر این پارامتر را نشان می دهد. به گونه ای که چمنی و بیرامی [۱] نشان دادند که عمق نسبی استخر به عدد فرود جریان و عمق بحرانی نسبی بستگی دارد، در حالیکه توکیای و یلدیز [۱۴] عمق نسبی استخر را مستقل از عدد فرود بیان کردند. همچنین مقادیر آزمایشگاهی اندازه گیری شده برای این پارامتر توسط توکیای و یلدیز [۱۴] بسیار بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی چمنی و بیرامی [۱] می باشد. بدین منظور جهت پیش بینی درست این پارامتر، عمق آب زیر جت در حال سقوط به عنوان پارامتری مهم در تعیین میزان استغراق شیب شکن، در نزدیکی لبه شیب شکن مورد اندازه گیری قرار گرفت.

شکل (۹- الف و ب) نشان دهنده تغییرات نسبی عمق استخر زیر جت در حال سقوط نسبت به عمق بحرانی نسبی و عدد فرود می باشد. مطابق شکل (۹- الف) مشاهده می گردد برای اعماق بحرانی نسبی کوچک رفتار عمق نسبی استخر تقریباً مشابه تحقیق های صورت گرفته توسط راجاراتنام و چمنی [۸] و اسن و همکاران [۱۰] برای جریان زیر بحرانی می باشد. این در حالی است که با افزایش عدد فرود و رسیدن آن به بازه ۴-۵ مقدار عمق نسبی استخر به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. دلیل این امر نیز کاهش زاویه برخورد

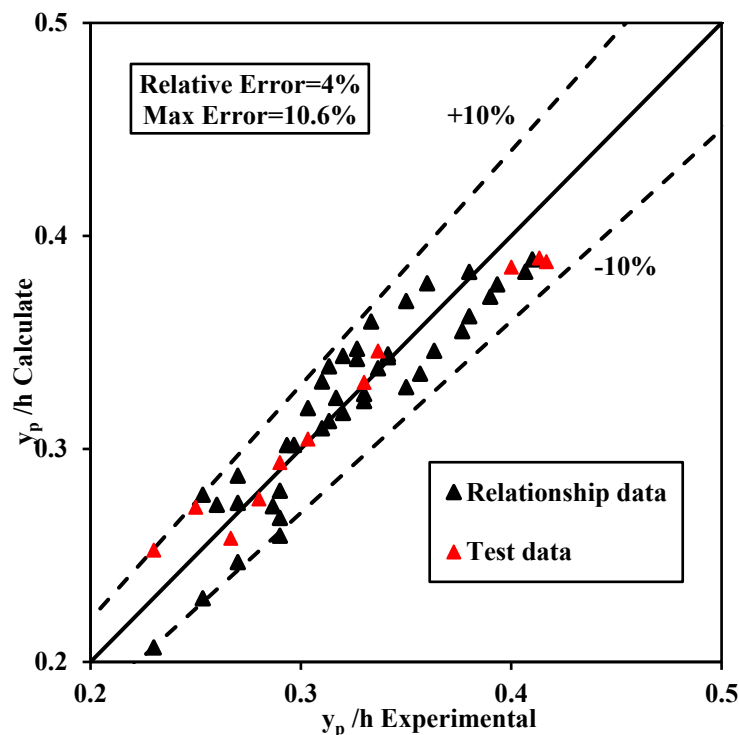
فرود مانند دو پارامتر طول شیب شکن و طول پاشیدگی می باشد. به طوریکه با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود مقدار این پارامتر افزایش می یابد. همچنین در یک عمق بحرانی نسبی ثابت با افزایش عدد فرود، طول نسبی کلی شیب شکن افزایش می یابد. برای عدد فرود ثابت نیز با افزایش عمق بحرانی نسبی، مقدار این پارامتر با افزایش روبه رو می شود. در ضمن با استفاده از داده های آزمایشگاهی رابطه (۱۴) برای پیش بینی طول نسبی کلی شیب شکن ارائه گردید:

$$\frac{L_D}{h} = 1.3335 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0.7193} (Fr)^{0.9873} + 0.7044 \quad (14)$$

مقایسه مقادیر آزمایشگاهی طول نسبی کلی شیب شکن با مقادیر پیش بینی شده آن نشان داد که متوسط خطای نسبی آن ۳/۹۶ درصد و حداکثر خطای موجود ۸ درصد می باشد.

#### ۳-۴ عمق استخر

مطالعات صورت گرفته در زمینه عمق نسبی استخر در جریان فوق بحرانی در بالادست شیب شکن های قائم توسط چمنی و بیرامی



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی  $\frac{y_p}{h}$  با مقادیر محاسباتی  
**Fig. 10. Comparison of laboratory values  $\frac{y_p}{h}$  with computational values**

بر حسب عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه (۱۵) نشان داد که متوسط خطای نسبی بین این دو مقدار ۱۷/۵ درصد می باشد. همچنین مقایسه مقادیر آزمایشگاهی عمق نسبی استخر با مقادیر پیش بینی شده آن در شکل (۱۰) نشان داده شده و بیان می دارد که متوسط خطای نسبی آن ۴ درصد و حداکثر خطای موجود ۱۰/۶ درصد می باشد.

### ۳-۵ استهلاک انرژی

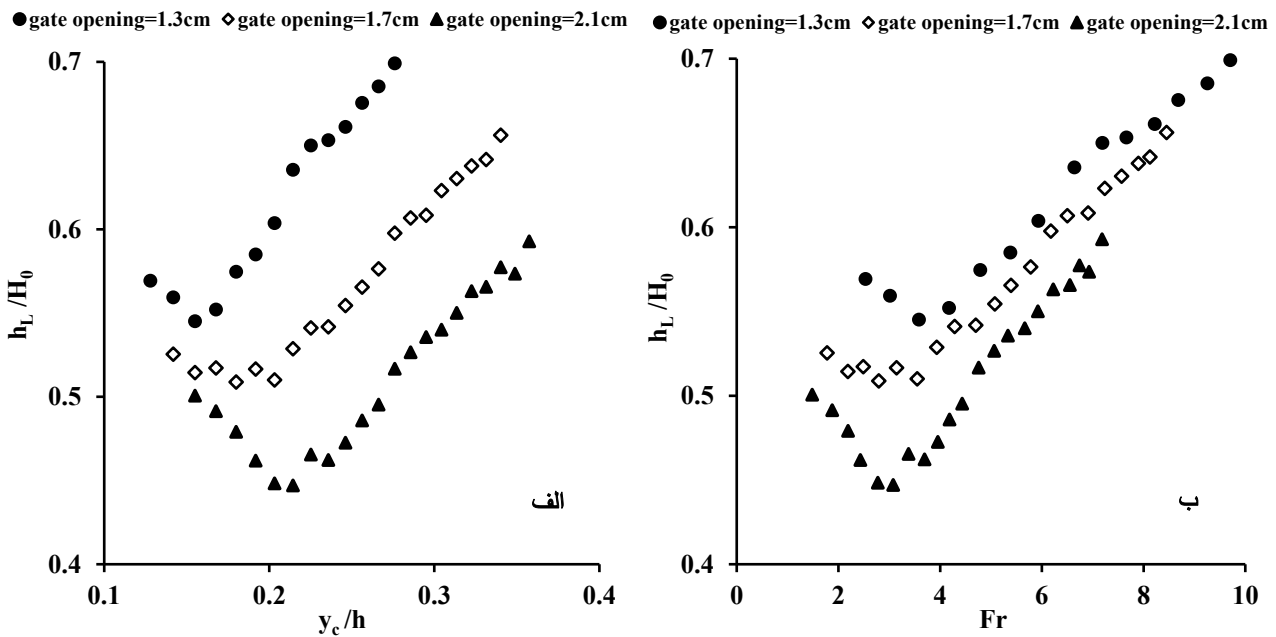
مطالعات صورت گرفته در زمینه استهلاک انرژی شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست فقط توسط چمنی و بیرامی [۱] و توکیای و یلدیز [۱۴] صورت پذیرفته است. چمنی و بیرامی [۱] با بررسی آزمایشگاهی نشان دادند که با افزایش عدد فرود استهلاک انرژی نسبت به جریان زیر بحرانی کاهش می یابد. در حالیکه توکیای و یلدیز [۱۴] استهلاک انرژی را مستقل از عدد فرود بالادست شیب شکن بیان کردند، با این وجود مقادیر استهلاک انرژی بدست آمده از آزمایش های ایشان برای جریان فوق بحرانی بسیار

جت با کف استخر و به تبع آن کاهش دبی برگشتی (جریان برگشتی) به داخل استخر زیر جت در حال سقوط می باشد.

همانطور که در شکل (۹-الف) نیز نشان داده شده است با افزایش عدد فرود در یک عمق بحرانی نسبی ثابت، عمق نسبی استخر کاهش می یابد. برای یک عدد فرود ثابت نیز با افزایش عمق بحرانی نسبی عمق نسبی استخر افزایش می یابد. همچنین مقایسه رفتار عمومی عمق نسبی استخر در تحقیق حاضر در مقابل عمق بحرانی نسبی نشان می دهد که همسو با نتایج چمنی و بیرامی [۱] رفتار این پارامتر کاملاً وابسته به مقادیر عدد فرود بالادست می باشد. برای پیش بینی رفتار عمق نسبی استخر برای جریان های فوق بحرانی رابطه (۱۵) بر حسب عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست ارائه گردید:

$$\frac{y_p}{h} = 17.86 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{1.9342} (Fr + 1.6374)^{\left( -2.6395 \frac{y_c}{h} \right)} \quad (15)$$

مقایسه مقادیر عمق نسبی استخر در مطالعه چمنی و بیرامی [۱]



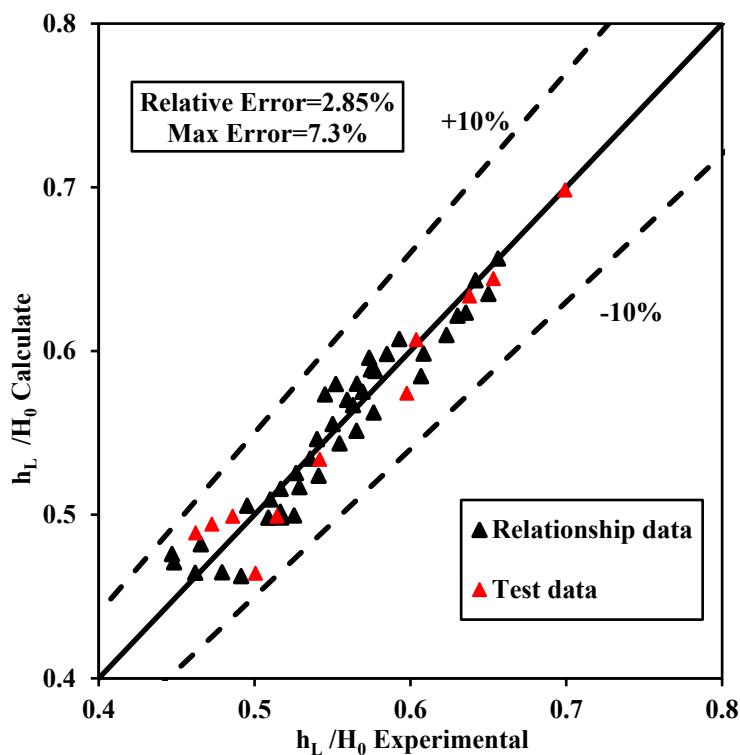
شکل ۱۱. تغییرات استهلاک انرژی نسبی نسبت به الف) عمق بحرانی نسبی و ب) عدد فرود بالادست  
 Fig. 11. Variation relative energy loss the to a) Relative critical depth and b) Froude number

(۱۱-ب) مشاهده می گردد که با افزایش میزان بازشدگی دریچه که رابطه مستقیمی با عمق بحرانی نسبی دارد میزان استهلاک انرژی نسبی کاهش می یابد. به عبارت دیگر می توان دریافت که افزایش عمق بحرانی نسبی نقش کاهشی در استهلاک انرژی نسبی و افزایش عدد فرود نیز نقش افزایشی در مقدار این پارامتر را دارند. بر این اساس برای تمامی بازشدگی ها در دبی های کم که مقادیر عمق بحرانی نسبی و عدد فرود کم است پارامتر کاهنده استهلاک انرژی (عمق بحرانی نسبی) بر پارامتر افزایش دهنده (عدد فرود) غلبه می کند که برای یک محدوده کوچکی، با افزایش عمق بحرانی و عدد فرود استهلاک انرژی نسبی کاهش می یابد. این در حالی است که با بیشتر شدن عمق بحرانی نسبی در یک بازشدگی ثابت پارامتر افزایش دهنده استهلاک انرژی بر پارامتر کاهنده آن غلبه می کند و باعث افزایش استهلاک انرژی نسبی می شود. علت کاهش استهلاک انرژی برای یک محدوده ی عمق بحرانی نسبی در یک بازشدگی ثابت، کم بودن تلاطم ناشی از پاشیدگی جریان می باشد که باعث می شود که رفتاری شبیه به رفتار جریان های زیر بحرانی داشته باشد. با این وجود در این محدوده نیز استهلاک انرژی برای جریان فوق بحرانی از جریان زیر بحرانی بیشتر است. با افزایش عمق بحرانی نسبی برای بازشدگی های ثابت و بعد از محدوده عدد فرود ۴-۵ مقادیر استهلاک

بیشتر از مطالعه چمنی و بیرامی [۱] و مطالعات گذشته در خصوص جریان زیر بحرانی می باشند.

استهلاک انرژی نسبی به عنوان مهم ترین هدف استفاده از شیب شکن های قائم، معمولاً به جهت اثر ضربه ای جت به کف استخر و تلاطم جریان در استخر زیر جت رخ می دهد. در شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست، ضربه ی برخوردی به کف به دلیل سرعت بیشتر جریان با شدت بیشتری صورت پذیرفته که این عامل باعث پاشیدگی جریان بعد از برخورد جت با کف می گردد. وجود پاشیدگی جریان در پایین دست، خود با افزایش تلاطم و افزایش سطح تماس آب با هوا باعث افزایش استهلاک انرژی می گردد. شکل (۱۱-الف و ب) نشان دهنده تغییرات استهلاک انرژی نسبی نسبت به عمق بحرانی نسبی و عدد فرود می باشد.

همانطور که در شکل (۱۱-الف و ب) نیز نشان داده شده است با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود بالادست در یک بازشدگی دریچه ثابت میزان استهلاک انرژی نسبی ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. همچنین لازم به ذکر است مطابق شکل (۱۱-الف) مشاهده می گردد که در یک عمق بحرانی نسبی ثابت با کاهش میزان بازشدگی که رابطه عکسی با عدد فرود دارد میزان استهلاک انرژی نسبی افزایش می یابد. برای یک عدد فرود ثابت نیز مطابق شکل



شکل ۱۲. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی  $\frac{h_L}{H_0}$  با مقادیر محاسباتی

Fig. 12. Comparison of laboratory values  $\frac{h_L}{H_0}$  with computational values

بحرانی ارائه شده است:

$$\frac{h_L}{H_0} = 0.091 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{-0.694} (Fr + 0.912)^{\left( 0.2083 + \frac{y_c}{h} \right)} \quad (16)$$

مقایسه مقادیر آزمایشگاهی طول نسبی شیب شکن با مقادیر پیش بینی شده آن نشان داد که متوسط خطای نسبی آن ۲/۸۵ درصد و حداکثر خطای موجود ۷/۳ درصد می باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست پرداخته شده است. با اجرای ۵۵ آزمایش با دبی ها و اعداد فرود مختلف پارامترهای طول شیب شکن، طول پاشیدگی، طول کلی شیب شکن، عمق استخر و استهلاك انرژی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با توجه به وجود تناقض های بسیار زیاد در خصوص پیش بینی این

انرژی افزایش می یابد. علت این امر نیز افزایش قدرت ضربه ای جت به کف استخر و افزایش تلاطم ناشی از پاشیدگی جریان می باشد.

مقایسه رفتار پارامتر استهلاك انرژی نسبی تحقیق حاضر با تحقیق های صورت گرفته توسط چمنی و بیرامی [۱] و توکیای و یلدیز [۱۴] نشان می دهد که نتایج تحقیق حاضر هیچ وجه مشترکی با تحقیق صورت گرفته توسط چمنی و بیرامی [۱] ندارد. بنظر می رسد دلیل رفتار کاملاً متفاوت دو تحقیق، عدم در نظر گرفتن تأثیر پاشیدگی جریان بعد از برخورد جت به کف در استهلاك انرژی توسط چمنی و بیرامی [۱] می باشد. به همین دلیل نیز مقادیر استهلاك انرژی تحقیق حاضر بسیار بیشتر از تحقیق چمنی و بیرامی [۱] می باشد. همچنین مقایسه رفتار استهلاك انرژی تحقیق حاضر با تحقیق توکیای و یلدیز [۱۴] نشان از وجود تشابه در رفتار کاهشی استهلاك انرژی با افزایش عدد فرود تا محدود ۴ می باشد. این در حالی است که مقادیر استهلاك انرژی نسبی توکیای و یلدیز [۱۴] نیز بیشتر از مقادیر آزمایشگاهی تحقیق حاضر می باشد. همچنین رابطه (۱۶) برای پیش بینی استهلاك انرژی نسبی برای جریان های فوق

پارامترها نتایج تحقیق حاضر با پژوهش های صورت گرفته در این زمینه مقایسه گردید. لازم به توضیح است با توجه به نوپا بودن مدل ارائه شده و با وجود رعایت اصول آنالیز ابعادی و ارائه تمامی پارامترها به صورت بدون بعد، در مدلسازی این تحقیق پروتوتایپ خاصی مد نظر نبوده است. همچنین با توجه به نتایج این تحقیق و انجام تحقیقات مشابه در آینده، استفاده از این روش در مقیاس عملی باید بر اساس مدل سازی از یک پروتوتایپ انجام شود و اثر مقیاس بر روی مدل ساخته شده بررسی گردد.

نتایج زیر در خصوص تأثیر عدد فرود در پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن قائم برای مدل آزمایشگاهی تحقیق حاضر به صورت زیر ارائه گردید:

۱- طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی و طول نسبی کلی شیب شکن با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود افزایش می یابند.

۲- با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود، عمق استخر ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. این در حالی است که استهلاك انرژی نسبی با افزایش عمق بحرانی نسبی و عدد فرود ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد.

۳- در یک عمق بحرانی نسبی ثابت با افزایش عدد فرود پارامترهای طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی، طول نسبی کلی شیب شکن و استهلاك انرژی نسبی افزایش و عمق نسبی استخر کاهش می یابد.

۴- با افزایش عمق بحرانی نسبی در عدد فرود ثابت، پارامترهای طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی، طول نسبی کلی شیب شکن و عمق نسبی استخر افزایش و استهلاك انرژی نسبی کاهش می یابد.

۵- نتایج تحقیق حاضر در خصوص تأثیر عدد فرود بالادست بر روی رفتار پارامترهای طول نسبی شیب شکن، طول نسبی پاشیدگی و طول کلی شیب شکن همسو با نتایج توکیای و یلدیز [۱۴] می باشد. این در حالی است رفتار عمق نسبی استخر در این تحقیق همسو با نتایج چمنی و بیرامی [۱] و مغایر با توکیای و یلدیز [۱۴] بدست آمد. همچنین نتایج مربوط به استهلاك انرژی نسبی هیچ وجه مشترکی با تحقیق صورت گرفته توسط چمنی و بیرامی [۱] نداشته و فقط رفتار کلی آن در بازه عدد فرود کوچکتر از ۴ تشابه کمی با نتایج توکیای

و یلدیز [۱۴] دارد.

۶- با در نظر گرفتن داده های آزمایشگاهی در بازه عدد فرود بزرگتر از سایر تحقیق های صورت گرفته، با هدف پیش بینی دقیق رفتار پارامترهای هیدرولیکی شیب شکن های قائم با جریان فوق بحرانی در بالادست روابطی با معیارهای ارزیابی قابل قبول ارائه گردید.

#### نمادها

|          |  |
|----------|--|
| $B$      | عرض کانال (متر)  |
| $H_0$    | هد کل در مقطع بالادست شیب شکن (متر)                            |
| $H_1$    | هد کل بعد از محل برخورد جت با کف استخر (متر)                   |
| $f$      | تابع (بی بعد)  |
| $Fr_0$   | عدد فرود بالادست (بی بعد)                                      |
| $g$      | شتاب گرانشی زمین (متر بر مجذور ثانیه)                          |
| $h$      | ارتفاع شیب شکن (متر)   |
| $L_d$    | فاصله محل برخورد جت با لبه شیب شکن یا طول شیب شکن (متر)        |
| $L_D$    | طول کلی شیب شکن (متر)  |
| $L_{sp}$ | طول پاشیدگی (متر)  |
| $Q$      | دبی کل (متر مکعب بر ثانیه)                                     |
| $q$      | دبی در واحد عرض کانال (متر مربع بر ثانیه)                      |
| $q_c$    | دبی برگشتی به داخل استخر در واحد عرض کانال (متر مربع بر ثانیه) |
| Re       | عدد رینولدز (بی بعد)   |
| $y_0$    | عمق بالادست شیب شکن (متر)                                      |
| $y_1$    | عمق بالادست شیب شکن (متر)                                      |
| $y_c$    | عمق بحرانی (متر)   |
| $y_p$    | عمق استخر زیر جت (متر)   |
| $h_L$    | استهلاك انرژی (متر)  |
| $\rho$   | جرم مخصوص آب (کیلوگرم بر متر مکعب)                             |
| $\mu$    | لزوجت دینامیکی (نیوتن بر متر مربع در ثانیه)                    |

#### منابع

[1] Chamani M. and Beirami, M.K. (2002). "Flow characteristics at drops", Journal of Hydraulic Engineering, 791-788 (8)128.



- (2017) "Flow characteristics of grid drop-type dissipators", Flow Measurement and Instrumentation, 306-298 54.
- [13] Sharif M. and Kabiri-Samani A. (2018) "Flow regimes at grid drop-type dissipators caused by changes in tail-water depth", Journal of Hydraulic Research, 12-1 (4)56.
- [14] Tokyay N.D and Yildiz D. (2007). "Characteristics of free overfall for supercritical flows", Canadian Journal of Civil Engineering, 169-162 2)34.
- [15] Liu S.I. Chen J.Y. Hong, Y.M. Huang H.S. and Raikar R.V. (2014) "Impact Characteristics of Free Over-Fall in Pool Zone with Upstream Bed Slope", Journal of Marine Science and Technology 486-476 (4)22.
- [16] Chanson H. and Toombes L. (1998) "Supercritical flow at an abrupt drop: Flow patterns and aeration", Canadian Journal of Civil Engineering 966-956 (5)25.
- [17] Rajaratnam N. (2008). "Turbulent jets Elsevier", 5.
- [18] Hager W.H. and Bremen R. (1989). "Classical hydraulic jump: sequent depths", Journal of Hydraulic Research, 585-565 (5)27.
- [19] Chow V.T. (1959). "Open Channel Hydraulics", Mc Graw Hill, New York.
- [20] Chanson H. and Gualtieri C. (2008). "Similitude and scale effects of air entrainment in hydraulic jumps", Journal of Hydraulic Research, 44-35 (1)46.
- [21] M. Mossa, A. Petrillo, H. Chanson, Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop, Journal of Hydraulic Research, 51-39 (2003) (1)41.
- [2] Gill M.A. (1979) "Hydraulics of rectangular vertical drop structures", Journal of Hydraulic Research, 302-289 (4)17.
- [3] Bakhmeteff M.W. (1932). "Hydraulics of open channels", McGraw-Hill book company, Inc, New York and London.
- [4] Moore W.L. (1943). "Energy loss at the base of a free overfall", Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1360-1343 (1)108.
- [5] White M.P. (1943) "Discussion of Moore", ASCE 108 1364-1361.
- [6] Rand W. (1955) "Flow geometry at straight drop spillways", In Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 13-1 (9)81.
- [7] Chanson H. (1995). "Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways".
- [8] Rajaratnam N. and Chamani M.R. (1995) "Energy loss at drops", Journal of Hydraulic Research, 384-373 (3)33.
- [9] Chamani, M.R. Rajaratnam, N. and Beirami, M.K. (2008). "Turbulent jet energy dissipation at vertical drops", Journal of hydraulic engineering, 1535-1532 (10)134.
- [10] Esen I.I. Alhumoud J.M. and Hannan K.A. (2004) "Energy Loss at a Drop Structure with a Step at the Base", Water international 529-523 (4)29
- [11] Hong Y.M. Huang, H.S. and Wan S. (2010) "Drop characteristics of free-falling nappe for aerated straight-drop spillway", Journal of Hydraulic Research -125 (1)48 129.
- [12] Kabiri-Samani, A.R. Bakhshian, E. and Chamani, M.R.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Daneshfaraz, S. Sadeghfam, V. Hasanniya, Experimental investigating effect of Froude number on hydraulic parameters of vertical drop with supercritical flow upstream, Amirkabir J. Civil Eng., 52(7) (2020) 1765-1782.

DOI: [10.22060/ceej.2019.15655.5985](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15655.5985)



